

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 425 469**

21 Número de solicitud: 201300455

51 Int. Cl.:

G01R 31/08

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

10.05.2013

43 Fecha de publicación de la solicitud:

15.10.2013

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (100.0%)
Pabellón de Gobierno, Avda. de los Castros s/n
39005 Santander (Cantabria) ES**

72 Inventor/es:

MANTILLA PEÑALBA, Luis Fernando

54 Título: **Método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica**

57 Resumen:

Método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica formada por tres conductores activos (11), que comprende las etapas de:

- entre los puntos de conexión de la red eléctrica (15) correspondientes a cada par de conductores activos (11), medir el valor eficaz de la tensión fase-fase;
- anotar el valor eficaz asignado o nominal de tensión de la red eléctrica (U_{rtd}),
- a partir de los tres valores eficaces de tensión fase-fase, calcular su valor medio aritmético (U_{avg}) y seleccionar el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o defecto, (U_{maxdev}) de dicho valor medio aritmético (U_{avg});
- obtener un índice que represente el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica (15);
- obtener un índice que represente la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente (U_{maxdev}) y el valor medio aritmético (U_{avg});
- obtener un índice que represente la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos (11) y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos (11);
- a partir de dichos tres índices, clasificar el desequilibrio de la red de tensión trifásica.

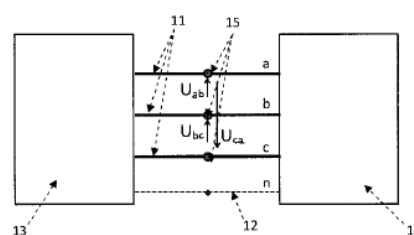


Figura 1

DESCRIPCIÓN

**MÉTODO DE ANÁLISIS DEL DESEQUILIBRIO DE UNA RED
ELÉCTRICA TRIFÁSICA**

5 **CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención pertenece al campo del transporte y de la distribución de energía eléctrica y, más concretamente, al de la medida y el análisis del desequilibrio de redes eléctricas trifásicas.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

La calidad de la energía eléctrica es un asunto de gran importancia tecnológica y económica para los operadores eléctricos y para los consumidores de los sectores industrial, comercial y residencial. Una calidad deficiente conlleva pérdidas económicas considerables, y un extenso catálogo de disfunciones operativas y perjuicios técnicos en la mayor parte de los equipos alimentados.

20

Entre las perturbaciones de la calidad de onda en redes trifásicas se encuentra la desigualdad de los valores de las tensiones de alimentación (o tensiones de la red o tensiones del sistema, indistintamente) respecto del valor asignado de la red (U_{rd}). Es la perturbación denominada desequilibrio de tensión trifásico. Se entiende que tanto este valor de tensión de alimentación como los valores de tensión que se mencionan a lo

25

largo del documento, son valores eficaces de tensión de la onda sinusoidal correspondiente.

30

Las definiciones normalizadas del concepto de desequilibrio de tensión más extendidas internacionalmente, han sido editadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en su Vocabulario Electrotécnico Internacional (IEV) [1] y por el Instituto de

Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en su Diccionario Autorizado de Términos Estándar IEEE [2].

Desequilibrio de tensión de un sistema trifásico

5

10

En relación al desequilibrio de tensión de un sistema trifásico se encuentra la definición normalizada IEV 603-02-19, relativa al área de la gestión y planificación de sistemas de potencia en la generación, transmisión y distribución de la electricidad (cálculo de redes). Ésta es una definición general que corresponde a todos los sistemas polifásicos, siendo aplicable al caso particular de tres fases (trifásico). Esta definición estipula que el régimen desequilibrado de una red polifásica es el estado en el cual las tensiones y/o corrientes en los conductores de fase no forman un conjunto polifásico equilibrado.

15

En el área de la compatibilidad electromagnética (fluctuaciones de tensión y flicker), y también con un carácter general aplicable al caso trifásico, la definición IEV 161-08-09 establece que el desequilibrio de tensión en un sistema polifásico, es el estado en el cual los valores de las tensiones entre conductores o las diferencias de fase entre conductores, no son todos iguales.

20

Por otra parte, en el área de la operación en generación, transmisión y distribución de la electricidad (calidad de la alimentación o de la red o del sistema), la definición IEV 604-01-29 describe el desequilibrio de tensión de un sistema trifásico como un fenómeno debido a las diferencias de desviación de la tensión en las fases, en un punto del sistema polifásico, causadas por diferencias entre las corrientes de las fases, o por asimetría geométrica en la línea.

25

30

Por su parte el diccionario autorizado IEEE, haciendo referencia a la norma [3] del área de las aplicaciones industriales de los convertidores electrónicos auto-conmutados, establece la definición de sistema trifásico desequilibrado como aquel sistema en el cual el valor de al menos una tensión (o corriente) de fase o tensión de fase-fase es significativamente diferente de las otras, o en el cual las diferencias angulares de

cualquier par de fases difiere significativamente de 120 grados. Termina la definición advirtiéndole que en un sistema trifásico desequilibrado existen componentes de secuencia negativa y de secuencia cero.

5 Obviamente, y para el caso trifásico, estas definiciones se basan en la representación matemática de las tres tensiones mediante números complejos (vectores giratorios o fasores) en el plano de Gauss. De este modo un sistema trifásico equilibrado estará representado por tres fasores de igual módulo cuyos ángulos de desfase son idénticos e iguales a 120 grados sexagesimales. Tanto en equilibrio como en desequilibrio, el
10 carácter giratorio representa la periodicidad temporal de la onda. Dado que solo tiene interés el comportamiento estacionario de un fenómeno a frecuencia constante, se puede obviar el carácter giratorio y se atiende solamente a las posiciones angulares relativas. Es decir, la ubicación de la referencia angular para la medida del ángulo de cada tensión es arbitraria. Por simplicidad es habitual disponer en el origen de ángulos
15 el fador de tensión más significativo.

Análisis de los sistemas desequilibrados

Convencionalmente, el análisis de los sistemas desequilibrados se resuelve aplicando el
20 Método de las Componentes Simétricas [4]. Al aplicar este método en los sistemas de fasores de las tensiones fase-fase, donde la suma de los tres fasores siempre se anula, solamente existen las componentes de secuencia positiva (directa) y negativa (inversa).

Estos sistemas desequilibrados, donde la suma de fasores es nula, se resuelven en dos
25 sistemas equilibrados que guardan un desfase angular entre ellos. Cada sistema componente es equilibrado y por eso puede ser representado por un único fador de tensión (los otros dos fasores son de igual amplitud y la distancia angular entre cada pareja del conjunto de tres fasores es 120°), situando normalmente el fador asociado a la tensión más significativa en el origen de ángulos.

30

Por tanto, se deduce fácilmente que para caracterizar unívocamente un sistema trifásico desequilibrado (cuya suma de fasores suman cero) es necesario aportar tres cantidades independientes. Por ejemplo, los dos valores de módulo de las componentes de secuencia positiva y negativa, y la diferencia angular de sus fasores. Sin embargo, estas tres cantidades o cualquier terna de valores conocida en el estado de la técnica no aportan simultáneamente información cualitativa para el operario e información del nivel de tensión.

Valoración del grado de desequilibrio

Debido a que los desequilibrios de tensión provocan efectos adversos, se impone la necesidad práctica de valorar el grado de desequilibrio en cada situación. Es decir, se necesitan índices numéricos que cuantifiquen en cada momento la intensidad de esta perturbación. Por otra parte, estos índices también sirven para adoptar medidas correctoras (mitigación del desequilibrio), o paliativas de los efectos en los equipos (desclasificación de motores eléctricos).

Como se ha comentado anteriormente, para caracterizar unívocamente un sistema trifásico desequilibrado es necesario aportar una terna de valores. No obstante, para valorar el grado de desequilibrio es suficiente con aportar dos índices o cantidades, no existiendo en el estado de la técnica dos de ellos que puedan mostrarse conjuntamente y aporten además información útil.

Para la valoración del grado de desequilibrio de tensión de un sistema desequilibrado, las normas internacionales han definido diferentes índices numéricos. En la actualidad operan diferentes definiciones normalizadas de estos índices (o factores indistintamente). En innumerables publicaciones se ha expuesto que las diferentes definiciones de estos factores de desequilibrio conducen a resultados numéricos distintos [5], [6] y [7]. También se ha puesto en evidencia que el dato aportado por cualquiera de estos índices, en un caso particular de desequilibrio, es insuficiente para caracterizar unívocamente la terna de fasores de tensión. Es decir, existen múltiples

sistemas desequilibrados que comparten el mismo valor de factor de desequilibrio de tensión, siendo sus condiciones eléctricas diferentes.

Índices de desequilibrio de tensión normalizados

5

10

15

El índice de desequilibrio con mayor aceptación internacional, denominado en muchas publicaciones “valor real” del desequilibrio, es la Tasa de Desequilibrio de Tensiones, en inglés “Voltage Unbalance Factor” (VUF). La IEC 604-01-30 es, desde 1987 [1], su definición normalizada para el área de la operación en generación, transmisión y distribución de la electricidad (calidad de la alimentación o de la red o del sistema), no obstante, se utiliza de forma generalizada en todas las áreas. Esta definición establece que la tasa de desequilibrio en un sistema trifásico, es el grado de desequilibrio expresado por la relación (en porcentaje) entre los valores de la componente de secuencia negativa (o secuencia cero) y la componente de secuencia positiva de la tensión o de la corriente. En este caso, la definición es aplicada a la tensión y no existe la componente de secuencia cero. Para obtener este índice es necesario aplicar previamente el método de las componentes simétricas. En términos matemáticos se escribe:

20

$$VUF = \frac{U_n}{U_p} * 100\%$$

25

30

Concretamente el VUF se emplea en [8] y [9], dos normas sobre compatibilidad electromagnética. La norma [8] incluye en su apartado de definiciones el término Factor de Desequilibrio (de Tensión): relación entre la componente de secuencia inversa y la componente de secuencia directa, medidas a la frecuencia de red (50 Hz o 60 Hz) según se definen en el método de las componentes simétricas. Para su cálculo se transcribe la fórmula anterior, y se agrega una nota informando de que, en una red, las tensiones de secuencia inversa se deben principalmente a la circulación por la red de corrientes de secuencia inversa de las cargas desequilibradas. Por su parte, la norma [9] en la definición 3.32, acerca del concepto de desequilibrio de tensión, adjunta una nota

que dice que el grado de desigualdad (de las tensiones) se expresa normalmente con las relaciones entre las componentes de secuencia, negativa y cero, y la componente de secuencia positiva. Además el apartado 5.7.1 de [9], dedicado a la medida del desequilibrio con instrumentos de clase A, incluye fórmulas para el cálculo original (definición original del VUF) y alternativo del factor de desequilibrio de tensión previamente definido.

El cálculo alternativo utiliza los valores de las tensiones fase-fase, y exige que la componente de secuencia cero y el contenido armónico sean de valor reducido. Lejos de estas limitaciones, la fórmula para el cálculo original se puede aplicar con tensiones de fase o con tensiones de fase-fase, el resultado es idéntico. Las fórmulas para el cálculo alternativo son:

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\%$$

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

La definición original del VUF requiere cálculos con números complejos con los correspondientes inconvenientes en la práctica industrial. El cálculo alternativo anterior elude las cantidades angulares, emplea las habituales lecturas voltimétricas y permite estimar el VUF con suficiente precisión (si se cumplen las limitaciones citadas). Por los motivos expuestos, también han sido publicadas fórmulas para el cálculo aproximado a lo largo de los años en la literatura técnica. Un ejemplo es la nota adjunta a la definición 3.2.8 de la norma [10] del área de la compatibilidad electromagnética. En esa definición la norma [10] acoge (con una modificación menor) la IEC 161-08-09, y contribuye al cálculo simplificado del VUF en la segunda nota diciendo: Varias aproximaciones dan resultados suficientemente precisos para los niveles de desequilibrio (relación de las tensiones inversa y directa) normalmente encontrados. A

continuación incluye la siguiente fórmula de cálculo aproximado basada en los valores de la componente fundamental de las tensiones fase-fase:

$$VUF = \sqrt{\frac{6(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})^2}} - 2 * 100\%$$

5

Según lo expuesto en los párrafos precedentes, la normalización internacional ha consolidado un único factor de desequilibrio, y ha procurado fórmulas para el cálculo exacto y aproximado.

10

No obstante, los organismos de normalización norteamericanos han generado varios índices para valorar el desequilibrio trifásico de tensión, que también son extensamente utilizados. En concreto, en el ámbito de la maquinaria eléctrica (motores y generadores) destaca el índice definido por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) [11], el PVU.

15

En varias partes de la norma [11], se define el denominado Desequilibrio Porcentual de Tensión (PVU), en inglés “percent voltage unbalance”, como la relación entre el valor absoluto de la diferencia de la tensión fase-fase más desviada y la media aritmética, y esta media aritmética de los valores de las tres tensiones fase-fase. La expresión matemática resulta

20

$$PVU = \frac{|U_{\max dev} - U_{avg}|}{U_{avg}} * 100\%$$

25

Además, los organismos de normalización norteamericanos agregan los índices amparados por normas IEEE en diferentes áreas tecnológicas, adoptando el VUF y el PVU, y también editando nuevos índices para la valoración del desequilibrio.

Entre los índices normalizados en el ámbito norteamericano caben reseñar los compilados en el Diccionario [2]. Entre las definiciones incorporadas al Diccionario (procedentes de otras normas) se encuentran el VUF, tomado de [14] y denominado “Voltage Imbalance”; de nuevo el VUF, tomado de [3] y registrado también con la denominación “unbalance factor”; y un índice nuevo tomado de [3] y denominado “unbalance ratio”.

Curiosamente el Diccionario incorpora directamente (a partir de una referencia no normativa) un singular índice de valoración del desequilibrio denominado Porcentaje de Desequilibrio de las Tensiones de Fase, en inglés “percent unbalance of phase voltages”. El nuevo índice resulta de adaptar la fórmula del factor de desequilibrio NEMA a los valores de las tensiones de fase, modificación que conduce a valores distintos. La referencia procede de la Sociedad IEEE de Sistemas Electrónicos y aeroespaciales (AEES) en relación con el asunto de la conversión energética. Reservamos para este índice la notación PVU_{IEEE} .

Tomando el orden cronológico de las últimas publicaciones de las normas IEEE, en primer lugar se encuentra [3]. Esta Guía de convertidores auto-conmutados, en el apartado 2.6 de definiciones relativas a características de los convertidores con salida en corriente alterna, introduce dos índices diferentes de valoración del desequilibrio. Uno coincide con el VUF y es denominado Factor de Desequilibrio (UF), en inglés “Unbalance Factor”. El otro índice se define como la diferencia entre el mayor y el menor de los valores (componente fundamental) en un sistema trifásico, referida a la media aritmética de los tres valores (componente fundamental) de las corrientes o tensiones, respectivamente, y es denominado Relación de Desequilibrio (UR), en inglés “Unbalance Ratio”. En ambas definiciones no se especifica el tipo de tensión que debe aplicarse (fase o fase-fase). Las expresiones matemáticas correspondientes serían:

$$UF = \frac{U_n}{U_p} * 100\%$$

$$UR = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{avg}}} * 100\%$$

En segundo lugar cronológico se encuentran las normas [12] y [13] que son dos prácticas recomendadas para sistemas eléctricos de potencia en edificios comerciales y para distribuciones de potencia eléctrica en plantas industriales, respectivamente. Ambas normas dedican un apartado a la medida del desequilibrio de las tensiones de fase, toman las fórmulas matemáticas de los índices VUF y PVU, y aplican los valores de esas tensiones. Estas normas orientan al usuario indicando que, el VUF es la mejor expresión y el PVU la forma más simple, para valorar el grado de desequilibrio.

Continúa la norma [14], Práctica recomendada para evaluar la compatibilidad de los sistemas eléctricos de potencia y los equipos de proceso electrónico, adoptando la fórmula del VUF para definir un índice que se denomina Desequilibrio de Tensión, en inglés “voltage imbalance (unbalance)”. Por su parte, la norma [15], Procedimientos de ensayos normalizados para generadores y motores de inducción polifásicos, adopta el PVU para hacer recomendaciones sobre límites máximos de desequilibrio aceptables de las fuentes de energía empleadas en los ensayos.

Dedicada al asunto de la monitorización de la calidad de la onda eléctrica, la práctica recomendada [16] define el desequilibrio de tensión adoptando el VUF, y dedica un apartado específico de recomendaciones para la medida del desequilibrio. La norma declara que el VUF es el índice recomendado y preferido porque representa directamente y sin aproximaciones matemáticas el fenómeno. Sin embargo, advierte que es habitual que los instrumentos de medida capturen los valores de las tensiones fase-fase y utilicen el PVU (referencia a la norma [13]). Informa y advierte de que el PVU es un índice auspiciado por las normas [11] y [17]. Para conciliar la recomendación del VUF con la evitación del empleo de los valores complejos de las componentes de secuencia, la norma [16] propone las mismas fórmulas de de cálculo alternativo del VUF de la norma [9] y señala sus limitaciones.

Por último, la Guía para la aplicación de electrónica de potencia para mejorar la calidad de la onda eléctrica en sistemas de distribución de 1 KV a 38 kV, referencia [18], define el desequilibrio de tensión igual que la norma [16], adoptando el VUF y sugiriendo el empleo del índice PVU para una estimación aproximada (con limitaciones).

Concepto de nivel de tensión en el desequilibrio trifásico

El nivel de la tensión, valor de tensión de la alimentación desequilibrada, no es un parámetro inherente al desequilibrio. Idéntico grado de desequilibrio puede presentarse con mayores o menores tensiones en las fases. Sin embargo, resulta imprescindible establecer esta cuestión porque permite llegar a la esencia de la condición del desequilibrio.

Obviamente, en los sistemas desequilibrados los valores de las tres tensiones no pueden ser todos iguales, y por otro lado, en la práctica, resulta muy interesante disponer de un único valor de tensión caracterizador del conjunto. En las normas tecnológicas actuales no existe definición normalizada del nivel de tensión de una alimentación desequilibrada. Esta carencia de normalización hace necesario consultar los trabajos de investigación para describir el estado actual de la técnica en este aspecto. Dada la especial incidencia del desequilibrio en el funcionamiento del motor de inducción trifásico, todas las referencias que se citan a continuación se refieren a este dispositivo eléctrico.

Las referencias más destacadas [19], [20], [21] y [22] se agrupan en dos categorías. Las dos primeras son investigaciones experimentales donde, para caracterizar el nivel de tensión, se elige el valor medio aritmético de las tres tensiones (U_{avg}) simplificando las medidas a realizar. Las dos siguientes son investigaciones basadas en modelos matemáticos donde el empleo del método de las componentes simétricas conduce a la elección de la componente de secuencia positiva (U_p) para caracterizar el nivel de la tensión.

Clasificación del desequilibrio trifásico

Al igual que en el caso del nivel de tensión, no existen clasificaciones normalizadas de los estados de desequilibrio trifásico. En la literatura técnica las aportaciones más destacadas y citadas son [21] y [23]. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se presenta una clasificación completa y rigurosa fundada en razonados argumentos científicos. En realidad, ambos estudios del desequilibrio de tensiones son reglas prácticas orientativas de ordenación de diferentes tipos de alimentación eléctrica (o red eléctrica o sistema eléctrico, indistintamente) que, considerando un determinado valor del factor de desequilibrio VUF, establecen una clasificación. El criterio fundamental de ordenación es la comparación del valor de las tensiones eléctricas con un valor referencial (tensión asignada del motor). En [23] se comparan directamente todas las tensiones de fase, y en [21] se comparan la componente de secuencia positiva y los valores individuales de las tensiones de fase.

En [23] se establecen ocho categorías que resultan de la comparación de los valores de las tres tensiones de fase con el valor U_{rd} de la tensión de fase asignada de la carga (motor). Dado que la tensión individual de fase puede ser mayor, menor o igual que la tensión de referencia (U_{rd}), en cada uno de los dos primeros casos se puede encontrar que una, dos o tres fases cumplen la condición (tres tipos de desequilibrio para cada caso). Cuando las tres tensiones individuales son iguales al valor de referencia, el estudio establece dos posibilidades en función del número de fases que cambien su posición angular original (equilibrio). Las denominaciones de las ocho categorías son:

- Desequilibrio monofásico (o bifásico, trifásico) en sobretensión 1 Φ -OV (2 Φ -OV, 3 Φ -OV)
- Desequilibrio monofásico (o bifásico, trifásico) en subtenión 1 Φ -UV (2 Φ -UV, 3 Φ -UV)
- Desequilibrio con desplazamiento angular de fase monofásico (o bifásico) 1 Φ A (2 Φ -A)

En [21] se establecen tres categorías de desequilibrios en función del valor de la componente de secuencia positiva de las tensiones de fase en relación con el valor U_{rtd} de la tensión de fase asignada de la carga (motor).

- Sobretensión desequilibrada (UBOV) $U_p > U_{rtd}$
- 5 - Subtensión desequilibrada (UBUV) $U_p < U_{rtd}$
- Tensión igual desequilibrada (UBEV) $U_p = U_{rtd}$

En cada una de las dos primeras categorías se puede encontrar que todas las tensiones de fase verifican la misma condición que la componente de secuencia positiva, o bien
10 que, al menos una tensión individual no lo verifica, denominado desequilibrio mixto. Por tanto se postulan cinco casos de desequilibrio de tensión, dos en sobretensión (completa o mixta), otros dos en subtensión (completa o mixta) y el desequilibrio con tensiones iguales desequilibradas.

15 Esta revisión del estado de la técnica deriva en una importante conclusión acerca del asunto del desequilibrio trifásico de tensiones eléctricas. Todo lo expuesto concluye que el tratamiento del desequilibrio adolece de limitaciones y carencias: Limitaciones en la valoración del grado de desequilibrio, que utiliza múltiples factores diferentes, incompletos y ambiguos en la caracterización del estado eléctrico, en algunos casos
20 poco prácticos, y diferentes en relación con el estado equilibrado de referencia; y carencias derivadas de esas limitaciones, como la inexistencia de criterios exhaustivos, simples y prácticos, para la ordenación y la clasificación de los tipos de desequilibrios.

Limitaciones en la valoración del grado de desequilibrio

25 En primer lugar se constata que existen varios factores de desequilibrio normalizados bastante diferentes entre sí (VUF, PVU, UR y PVU_{IEFF}). El consenso internacional para valorar el grado de desequilibrio no se ha logrado aún. Únicamente el VUF tiene un grado de aceptación extendido aunque se mantiene en competencia con el PVU. Siendo
30 factores muy diferentes, tanto en su formulación y cálculo, dan lugar a distintos

resultados numéricos. Considerando todos los factores antes presentados se advierten las siguientes limitaciones.

- Cada factor de desequilibrio requiere lecturas voltimétricas distintas, en unos casos de los valores de las tensiones de fase, y en otros de las tensiones de fase-fase.

- Los cálculos previos a la aplicación del algoritmo de obtención del factor de desequilibrio también son distintos. En un caso, requiere operar con números complejos para obtener las componentes de secuencia (VUF), y en otros casos, sencillas operaciones aritméticas para obtener los valores medios, máximos o mínimos (resto de factores).

- En idénticas condiciones de la alimentación (o red o sistema, indistintamente), los diversos factores de desequilibrio conducen a resultados numéricos distintos. Esta disparidad de resultados no está suficientemente acotada, es incierta. Normalmente resulta menor cuanto mayor es la proximidad al estado de equilibrio de la alimentación.

Todo lo anterior evidencia una carencia de unicidad en la definición del índice medidor del grado de desequilibrio. Se necesita una contribución a la generalización de un único factor para medir el desequilibrio.

En segundo lugar, derivado de la anterior diversidad, se constata la necesidad de formular correctamente las correspondencias matemáticas rigurosas entre los principales índices, que son el VUF y el PVU. Esta correspondencia puede obtenerse con la definición de índices de valoración que actúen como un nexo entre ambos.

En tercer lugar, y para todos los factores normalizados, se advierte su incapacidad para caracterizar unívocamente el estado de desequilibrio, y para permitir su interpretación gráfica. En consecuencia solo permiten una valoración ambigua. Cada factor se corresponde con varios y diferentes estados de la alimentación eléctrica, que comportan diferentes consecuencias operativas en la carga. En consecuencia, todos los factores conducen a una valoración incompleta del grado de desequilibrio. Una

valoración completa exigiría la conjunción de dos índices adecuados, y sin embargo, cualquier factor de los presentados aporta un único valor numérico. Por ejemplo, el VUF carece de información sobre el desfase angular de las componentes de secuencia. El PVU también carece de referencias angulares y trata sin distinción los

5 desequilibrios por desviación superior o inferior de la tensión.

En cuarto lugar, se advierten algunas inconveniencias prácticas en la aplicación de ciertos factores como el VUF y otros. El VUF, siendo el índice de valoración más extendido, requiere el empleo de la matemática de los números complejos algo

10 inapropiado en la práctica industrial por su dificultad operativa e innecesaria exposición a errores de cálculo. Por este motivo se han presentado cálculos alternativos y aproximaciones matemáticas, más o menos precisas, pero algo laboriosos de aplicar. Además, un valor concreto VUF no se corresponde de modo simple con los valores habituales de la práctica, que son las medidas voltimétricas de

15 valores de tensiones en las fases. También es un inconveniente práctico, en algunos casos, el empleo de factores de desequilibrio que requieren lecturas de tensiones de fase, porque no siempre están accesibles. En oposición resulta siempre viable la captura de tensiones fase-fase. Siempre serán aplicables los factores de desequilibrio que se basan en estas tensiones. Se necesitan factores de desequilibrio donde su valor

20 numérico indique una relación clara con las lecturas de tensión de la práctica operativa, porque con ello permiten actuaciones correctoras, limitadoras, preventivas u otras.

Por último, dado que los factores pretenden de algún modo medir la discrepancia del

25 estado desequilibrado respecto de un estado de equilibrio referencial que tiene un determinado nivel de tensión, resulta esencial separar las características intrínsecas del desequilibrio y del nivel de tensión del sistema de tensiones. Esto pasa por establecer con claridad el sistema de referencia. En los factores de desequilibrio citados se mezclan estos conceptos, y se emplean referencias equilibradas distintas.

30 Así el VUF, toma por referencia el sistema equilibrado formado por la componente de secuencia positiva. Sin embargo, este sistema no es invariable porque con las

variaciones operativas esta componente cambia constantemente. Por su parte, PVU, UR y PVU_{IEEE} toman la media aritmética de las tensiones, y relacionan con ella cantidades distintas. Se necesitan índices que midan las propiedades intrínsecas del desequilibrio, y se necesita establecer una referencia clara del nivel de tensión del sistema desequilibrado.

Carencias en la clasificación del desequilibrio

Las limitaciones de los factores anteriores, incapacidad de caracterización unívoca y de permitir representar gráficamente los estados de desequilibrio, la ambigüedad en la valoración y la mezcla de las propiedades intrínsecas del desequilibrio con el nivel de tensión del sistema, impiden el planteamiento de una clasificación exhaustiva e ilustrativa del estado de desequilibrio. En consecuencia actualmente se carece de una clasificación normalizada simple y práctica de los tipos posibles de desequilibrio.

Una propuesta clasificadora es de gran interés práctico. En esencia, los desequilibrios son perturbaciones donde se pierde el orden establecido en un equilibrio de referencia, pero esta pérdida no es completa. Con el establecimiento de tipos de desequilibrio se revela el grado de ordenación elemental que aún existe en este tipo de alimentaciones. Un ejemplo del interés práctico, extraído del área de estudio de los huecos de tensión, es la propuesta del grupo de trabajo C4.110 de CIGRE/CIREN/UIE [24].

Las propuestas de clasificación [21] y [23] tienen importantes deficiencias y carecen de justificación matemática. Incluso se podría afirmar, que están más enfocadas a tratar el tema del nivel de tensión en sistemas desequilibrados, que la problemática propia del desequilibrio. Por otra parte, también tienen alguna dificultad práctica al requerir la medida de tensiones de fase, que no siempre son viables. Más aún en [23] se precisa la lectura de desfases angulares, medición o cálculo que resulta aún más incómodo para los operarios.

Ambas propuestas establecen tipos de desequilibrios que comparten el mismo valor del factor de desequilibrio VUF. Sin embargo, no aclara si los valores concretos de alimentación que determinan un valor del VUF, son los únicos estados de desequilibrio posibles. Es decir, no queda resuelta la cuestión de si existen estados de alimentación clasificados en un mismo tipo de desequilibrio que comparten el mismo valor del VUF.

REFERENCIAS

- [1] Serie normativa IEC 610050
- [2] IEEE Std. 100-2000 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition
- [3] ANSI/IEEE Std. 936-1987 IEEE Guide for Self-Commutated Converters
- [4] C.L. Fortescue. "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks" 1918
- [5] P. Pillay, M. Manyage. "Definitions of voltage unbalance" IEEE Power Engineering Review Mayo 2001
- [6] M.H.J. Bollen. "Definitions of voltage unbalance" IEEE Power Engineering Review Noviembre 2002
- [7] A.K. Singh, G.K. Singh, R. Mitra. "Some observations on definitions of voltage unbalance" 39th North American Power Symposium 2007
- [8] IEC 61000-4-27:2000 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-27: Testing and measurement techniques. Unbalance, immunity test.
- [9] IEC 61000-4-30:2003 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods.
- [10] IEC 61000-2-12:2004 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-12: Environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.
- [11] NEMA MG-1 Motors and generators 2006.
- [12] IEEE Std. 241-1990 IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings

[13] IEEE Std. 141-1993 (R1999), IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.

[14] IEEE Std. 1346-1998 IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment

5 [15] IEEE Std. 112-2004 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators

[16] IEEE Std. 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

10 [17] ANSI C84.1-2006 American National Standard for Electric Power Systems and Equipment – Voltage Ratings (60Hz)

[18] IEEE Std. 1409-2012 Guide for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems Rated 1 kV through 38 kV

15 [19] P. Pillay, P. Holfmann y M. Manyage. “Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages” IEEE Transactions on Energy Conversion Diciembre 2002

[20] J. Faiz, H. Ebrahimpour y P. Pillay. “Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor” IEEE Transactions on Energy Conversion Diciembre 2004

20 [21] P. Giridhar Kini, R. C. Bansal y R. S. Aithal. “A novel approach toward interpretation and application voltage unbalance factor” IEEE Transactions on Industrial Electronics Agosto 2007

[22] M. Anwari y A. Hiendro. “New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under- and overvoltage unbalance” IEEE Transactions on Energy Conversion Septiembre 2010

25 [23] Ching-Yin Lee. “Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor” IEEE Transactions on Energy Conversion Junio 1999

[24] CIGRE/CIRED/UIE Joint Working Group C4.110 “Voltage dip immunity of equipment and installations”. CIGRE 2010

30

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica que permite, mediante nuevos índices numéricos de aplicación universal, caracterizar de forma unívoca los valores de las tensiones de la red eléctrica trifásica desequilibrada, clasificar el desequilibrio de dicha red eléctrica trifásica, e informar del grado de desequilibrio.

Concretamente, en un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica formada por tres conductores activos, que comprende las etapas de:

- entre los puntos de conexión de la red eléctrica correspondientes a cada par de conductores activos, medir el valor eficaz de la tensión fase-fase;

- anotar el valor eficaz asignado o nominal de tensión de la red eléctrica (U_{rd}).

- a partir de los tres valores eficaces de tensión fase-fase, calcular su valor medio aritmético (U_{avg}) y seleccionar el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o defecto, (U_{maxdev}) de dicho valor medio aritmético (U_{avg});

- obtener un índice que represente el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica;

- obtener un índice que represente la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente (U_{maxdev}) y el valor medio aritmético (U_{avg});

- obtener un índice que represente la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos;

- a partir de dichos tres índices, clasificar el desequilibrio de la red de tensión trifásica.

En una posible realización, el índice que representa el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica se define como el cociente entre el valor medio aritmético (U_{avg}) de los tres valores eficaces de tensión fase-fase y el valor eficaz asignado o nominal de la tensión de la red eléctrica (U_{rtd}):

$$SVL = \frac{U_{avg}}{U_{rtd}}$$

En una posible realización, el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}) de los tres valores eficaces de tensión fase-fase, y dicho valor medio aritmético (U_{avg}) es:

$$ADF = \frac{U_{maxdev} - U_{avg}}{U_{avg}}$$

En una posible realización, el índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos, se define como el cociente entre la diferencia de los dos valores eficaces de tensión diferentes de U_{maxdev} , y U_{maxdev} ;

En una posible realización, el método comprende la etapa de informar del grado de desequilibrio de la siguiente forma:

-informar del tipo de desequilibrio, e
-indicar el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o por defecto, (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}), y dicho valor medio aritmético (U_{avg}).

Alternativamente, el método informa del grado de desequilibrio de la siguiente forma:

-indicar el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o por defecto, (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}), y dicho valor medio aritmético (U_{avg}), e

5 -indicar el índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

10 Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

15 La figura 1 muestra un esquema de una red eléctrica trifásica sobre la que se implementa el método de la invención.

La figura 2 muestra una posible representación gráfica en el plano de Gauss, de los tres fasores de las tensiones fase-fase de la red eléctrica desequilibrada.

20 La figura 3 muestra una posible representación gráfica en el plano de Gauss, de los tres fasores de las tensiones fase-fase de la red eléctrica desequilibrada en una posición singular de desequilibrio caracterizada por su equilibrio angular.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

25 En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

30 Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos

acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

5 Además, todos los valores de tensión deben entenderse como valores eficaces de tensión de la onda sinusoidal correspondiente.

10 Las características del método de la invención, así como las ventajas derivadas de las mismas, podrán comprenderse mejor con la siguiente descripción, hecha con referencia a los dibujos antes enumerados.

15 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

20 A continuación se describe el método para analizar el desequilibrio de una red eléctrica trifásica (o sistema eléctrico trifásico), de la invención. El método permite, mediante nuevos índices numéricos de aplicación universal, caracterizar de forma unívoca los valores de las tensiones de la red eléctrica trifásica desequilibrada, clasificar el desequilibrio de dicha red eléctrica trifásica, e informar del grado de desequilibrio.

25 La figura 1 representa una red eléctrica trifásica susceptible de sufrir los desequilibrios descritos anteriormente, y sobre la que se implementa el método de la invención. En la figura se muestra una fuente eléctrica 13 que alimenta una carga eléctrica 14, y que se encuentran conectadas por medio de tres conductores activos 11 (identificados con las letras *a*, *b*, *c*) y un conductor neutro 12.

30

Un experto en la materia entenderá que, asignadas las letras para la identificación de los conductores activos 11 (a , b , c), el orden de sucesión temporal de las tres ondas de tensión eléctrica entre pares de conductores activos 11 es U_{ab} , U_{bc} y U_{ca} en secuencia directa y U_{ab} , U_{ca} y U_{bc} en secuencia inversa. En la siguiente descripción y por simplicidad, las anotaciones y formulaciones matemáticas han sido expresadas para secuencia directa. No obstante, todos los resultados obtenidos en secuencia directa, tienen plena validez y son aplicables sin restricción alguna en secuencia inversa, intercambiando los valores U_{ca} y U_{bc} . Por lo tanto, la operación en secuencia inversa queda completamente incluida en esta invención, sin diferencias conceptuales.

Las lecturas voltimétricas entre cada par de conductores activos 11, permiten conocer los valores de las tres tensiones fase-fase (U_{ab} U_{bc} U_{ca}) proporcionadas por la fuente eléctrica 13. Si los tres valores (U_{ab} U_{bc} U_{ca}) son iguales, la red eléctrica trifásica está obligadamente equilibrada, siendo el valor de cada tensión fase-fase (U_{ab} U_{bc} U_{ca}) igual al valor medio aritmético de dichas tres tensiones U_{avg} ($U_{ab}= U_{bc}= U_{ca}= U_{avg}$). Sin embargo, una perturbación de la calidad de la onda impone en la red eléctrica un funcionamiento desequilibrado con tensiones diferentes de U_{avg} . Toda red eléctrica desequilibrada tiene al menos un valor de tensión fase-fase desigual entre al menos un par de conductores.

Las lecturas voltimétricas se realizan en unos puntos de conexión de la red eléctrica 15, caracterizados por un valor de tensión asignada o nominal (U_{rtd}) que debe anotarse.

A continuación, los tres valores de las tensiones fase-fase (U_{ab} U_{bc} U_{ca}) se ordenan de mayor a menor, y de esa ordenación se extrae el más alejado numéricamente, por exceso o defecto, de su valor medio aritmético U_{avg} . Este valor extremo se denota U_{maxdev} . En una posible realización, el valor extremo es el que actúa en las fases a y b ; es decir, U_{ab} es igual a U_{maxdev} . Por lo tanto, a lo largo de esta descripción se entiende que cualquier referencia a U_{ab} equivale a una referencia a U_{maxdev} .

La figura 2 muestra una posible representación de las tres tensiones de un sistema desequilibrado, teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, mediante tres fasores en el plano de Gauss ($\bar{U}_{ab}, \bar{U}_{bc}, \bar{U}_{ca}$) y una elipse auxiliar.

5 De acuerdo a la segunda Ley de Kirchhoff, el resultado vectorial de la suma de estos tres fasores es siempre nulo, independientemente de que las tensiones estén equilibradas o desequilibradas. Es decir, los tres fasores dispuestos sucesivamente forman con sus segmentos un triángulo para todos los estados operativos (equilibrados y desequilibrados) de la red eléctrica trifásica. Si la disposición
10 sucesiva de los fasores es $\bar{U}_{ca}, \bar{U}_{bc}$ y \bar{U}_{ab} el triángulo queda trazado entre los vértices F_2GF_1 .

Entre todos los posibles estados desequilibrados, aquellos que comparten los mismos valores de U_{avg} y U_{maxdev} , están ubicados en la elipse citada. En esta figura se
15 observan las relaciones geométricas que guardan los segmentos representativos de los valores de las tensiones (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}). La distancia entre los focos F_1 y F_2 de la elipse es el valor U_{maxdev} (U_{ab} en este ejemplo). El foco F_2 está situado en el origen del plano de Gauss y los puntos A, B, D y E son los vértices de la elipse. Las ramas inferior y superior de la elipse son los lugares geométricos de los fasores \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} ,
20 respectivamente. La recta de unión de los afijos de \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} siempre pasa por el centro de la elipse y mantiene un ángulo ϕ respecto de su eje menor DE. En esta invención se conviene que el ángulo es positivo cuando, en secuencia directa, U_{bc} es menor que U_{ca} . Es decir, en la figura 2 se representa un caso de valor negativo del ángulo ϕ .

25 Para cada valor \bar{U}_{ab} existe un estado de desequilibrio singular y destacado cuando los fasores \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} son de igual amplitud y ocupan posiciones que guardan el mismo ángulo respecto de \bar{U}_{ab} . Se denomina estado desequilibrado en equilibrio angular y se representa en la figura 3. En este estado los afijos de los fasores \bar{U}_{bc} y

$\overline{U_{ca}}$ se ubican en los extremos del eje menor de la elipse (puntos D y E respectivamente). En este caso, el ángulo ϕ toma un valor nulo.

Índices para una caracterización unívoca del desequilibrio

5

Los inventores han observado que, a partir de los valores de tensión de la red eléctrica medidos en los puntos de conexión de la red eléctrica 15, es posible obtener información muy valiosa para identificar de forma unívoca los desequilibrios. Así, han obtenido tres índices a partir de dicha información.

10

El primero de los índices, denominado por los inventores SVL, del inglés “Source Voltage Level”, define el nivel de tensión de la red eléctrica respecto del valor de tensión asignada (U_{rd}). Se denota SVL y se obtiene del cociente entre la tensión media de la red eléctrica trifásica U_{avg} y la tensión asignada de la red eléctrica U_{rd} .

15

Es un valor positivo mayor o menor que la unidad. Su formulación matemática es:

$$SVL = \frac{U_{avg}}{U_{rd}}$$

20

Los otros dos índices obtenidos por los inventores, son los índices específicos del grado de desequilibrio.

25

El índice denominado por los inventores ADF, del inglés “Amplitude Distortion Factor”, es el factor de distorsión de la amplitud. Deriva directamente del valor U_{maxdev} , y define la elipse citada anteriormente. Se denota ADF y expresa la discrepancia de los valores de la tensión extrema U_{ab} y de la tensión media U_{avg} . Es un valor positivo, negativo o nulo acotado en $[-1, +1/2]$. Su formulación matemática es:

$$ADF = \frac{U_{maxdev} - U_{avg}}{U_{avg}}$$

Un valor de ADF caracteriza un conjunto de estados desequilibrados, cuanto mayor es el valor absoluto de ADF los valores de las tensiones de la red eléctrica podrán ser más dispares entre sí (diferencia de valores respecto de U_{avg}) y sus fasores correspondientes más distantes respecto del estado desequilibrado en equilibrio angular (valores ϕ).

El índice ADF mantiene una relación matemática muy próxima al PVU perteneciente al estado de la técnica. En concreto, el PVU coincide con el valor absoluto del índice ADF. De dicha afirmación puede desprenderse que el índice PVU es incompleto, a pesar de ser ampliamente aceptado, ya que un cambio de signo conlleva diferencias de funcionamiento.

El segundo índice específico del grado de desequilibrio, denominado por los inventores ADI, del inglés “Angular Deviation Index”, es el índice de desviación angular. Permite determinar la ubicación de los fasores \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} , se denota ADI y deriva directamente del valor del ángulo ϕ . Es un valor positivo, negativo o nulo que está acotado. Su formulación matemática es:

$$ADI = \sin \phi = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{U_{\max dev}}$$

Debido a que los valores de las tensiones han sido previamente ordenados, y por tanto U_{bc} y U_{ca} son siempre menores o iguales que U_{ab} , existen unos valores de acotación $\pm ADI_{\max}$, cuya fórmula matemática es:

$$ADI_{\max} = \frac{|ADF|}{1 + ADF}$$

Cuanto mayor es el valor absoluto de ADI mayor es la separación del estado desequilibrado respecto del equilibrio angular. El índice ADI está acotado en $[-ADI_{\max}, +ADI_{\max}]$.

ADF es el índice principal del desequilibrio y el ADI complementa al anterior para alcanzar la definición completa del estado de desequilibrio. Cada estado de desequilibrio queda definido unívocamente por el SVL y los índices ADF y ADI.

5 Clasificación del fenómeno del desequilibrio y Grado de desequilibrio

La clasificación unívoca del desequilibrio se consigue con los tres índices mencionados anteriormente: SVL, ADF y ADI. Una vez obtenidos, los inventores proponen los siguientes criterios de clasificación.

10

Para identificar y nombrar los posibles desequilibrios en relación al nivel de tensión de la red eléctrica en el punto de análisis, se clasifica atendiendo al valor del SVL, obteniendo tres tipos de desequilibrios, denominados:

15

- Desequilibrio con sobretensión (overvoltage unbalance) $SVL > 1$
- Desequilibrio con subtensión (undervoltage unbalance) $SVL < 1$
- Desequilibrio genuino (genuine unbalance) $SVL = 1$

20

Para identificar y nombrar los posibles desequilibrios en relación al sentido de la discrepancia de los valores de las tensiones, se clasifica atendiendo al valor del ADF, obteniendo dos tipos de desequilibrios, denominados:

- Desequilibrio superior (upper unbalance) $ADF > 0$
- Desequilibrio inferior (lower unbalance) $ADF < 0$

25

Para identificar y nombrar los posibles desequilibrios en relación a la desviación angular, se clasifica atendiendo al valor del ADI, obteniendo dos tipos de desequilibrios, denominados:

30

- Desequilibrio positivo (positive disequilibrium) $ADI > 0$
- Desequilibrio negativo (negative disequilibrium) $ADI < 0$
- Equilibrio angular (angular equilibrium) $ADI = 0$

La clasificación unívoca del desequilibrio de una red eléctrica trifásica se consigue identificando su nivel de tensión y su grado de desequilibrio. El nivel de tensión se identifica cotejando el valor del índice SVL y el grado de desequilibrio se identifica cotejando los valores de los índices específicos ADF y ADI. Por lo tanto, el grado de desequilibrio queda definido mediante los dos índices específicos: ADF y ADI. ADF es el índice principal, y conlleva la acotación de los tres valores de tensión (U_{ab} U_{bc} U_{ca}). Si su valor es igual a cero no existe el desequilibrio, ya que obliga a que los tres valores de tensión sean igual a U_{avg} . La red eléctrica está en perfecto equilibrio trifásico.

En la tabla 1 se presentan todas las posibles combinaciones para la identificación del grado de desequilibrio.

	ADF < 0	ADF = 0	ADF > 0
ADI < 0	DESEQUILIBRIO INFERIOR NEGATIVO (DIN)		DESEQUILIBRIO SUPERIOR NEGATIVO (DSN)
ADI = 0	DESEQUILIBRIO INFERIOR EN EQUILIBRIO ANGULAR (DIEA)	EQUILIBRIO	DESEQUILIBRIO SUPERIOR EN EQUILIBRIO ANGULAR (DSEA)
ADI > 0	DESEQUILIBRIO INFERIOR POSITIVO (DIP)		DESEQUILIBRIO SUPERIOR POSITIVO (DSP)

Tabla 1. Identificación del grado de desequilibrio a partir de los índices ADF y ADI

A partir de las categorías de desequilibrio anteriores se evidencian simetrías de posición, equivalencias y semejanzas entre los estados. A continuación se revelan y denominan estos parentescos.

- Dos estados operativos desequilibrados, es decir, dos situaciones de trabajo diferentes de una misma red desequilibrada, mantienen “grados de desequilibrio idénticos” cuando coinciden los índices ADF y ADI. Serán dos estados operativos de distinto nivel de tensión, si los índices SVL son diferentes.

5

- Dos estados operativos desequilibrados tienen “desequilibrios similares” cuando tienen el mismo valor del índice ADF, siendo diferentes sus valores de ADI.

10

- Dos estados operativos desequilibrados tienen “desequilibrios angulares equivalentes” cuando, además de tener desequilibrios similares (igual ADF) tienen el mismo valor absoluto del índice ADI. Es decir, sus parejas de fasores \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} ocupan posiciones simétricas respecto del eje menor de la elipse auxiliar de la figura 2.

15

- Dos estados operativos desequilibrados tienen “desequilibrios opuestos” cuando, para valores arbitrarios de sus índices ADI, tienen el mismo valor absoluto del índice ADF.

20

- Incluyendo el factor VUF en estas consideraciones, puede demostrarse que dos estados operativos desequilibrados, con valores diferentes de ADF y ADI, gozan de “desequilibrios equivalentes VUF” cuando comparten el mismo valor numérico del factor indicado.

25

- Incluyendo el factor PVU en estas consideraciones, puede demostrarse que dos estados operativos desequilibrados, con valores diferentes de ADF y ADI, gozan de “desequilibrios equivalentes PVU” cuando comparten el mismo valor numérico del factor indicado.

30

Información del grado de desequilibrio

A continuación, y con independencia del nivel de tensión de la red SVL, los inventores proponen dos formas diferentes para informar del grado de desequilibrio del estado operativo de una red eléctrica en los puntos de conexión de la figura 1.

La primera es una forma simple que corresponde al estado operativo por su pertenencia a un conjunto de estados con desequilibrios similares los inventores la denominan forma aproximada de información.

La forma aproximada de información del grado de desequilibrio consiste en informar del tipo de desequilibrio (clasificación) y determinar su índice ADF. Por ejemplo, desequilibrio superior negativo de grado $ADF=0.05$. Para aplicar este modo de información deben medirse las tres tensiones fase-fase (U_{ab} U_{ca} U_{bc}), obtener los valores U_{avg} y U_{maxdev} , calcular el ADF y, por último, confrontar los valores (U_{ca} U_{bc}) y cotejar el signo de ADI para informar del tipo de desequilibrio según la tabla anterior. Si $U_{ca} > U_{cb}$ el desequilibrio es positivo, si $U_{ca} < U_{cb}$ el desequilibrio es negativo.

Esta información corresponde a un conjunto de estados desequilibrados, con los cuales la red eléctrica comparte características similares. Gráficamente este conjunto de estados están acotados para \bar{U}_{ab} en una posición única de amplitud $U_{avg} \cdot (1+ADF)$, y para \bar{U}_{bc} y \bar{U}_{ca} en los dos arcos elípticos simétricos que se extienden desde la posición de equilibrio angular hasta una posición extrema ϕ_{max} valor correspondiente al índice ADI_{max} .

La segunda es una forma de información unívoca y exclusiva del grado de desequilibrio de la propia red eléctrica trifásica, que los inventores denominan forma exacta de información, consistente en determinar los dos índices ADF y ADI.

Ventajas del método de la invención

El método de la invención soluciona los inconvenientes detectados en el estado actual de la técnica, ya que permite, mediante nuevos índices numéricos de aplicación universal, caracterizar de forma unívoca los valores de las tensiones de la red eléctrica trifásica desequilibrada, clasificar el desequilibrio de dicha red eléctrica trifásica, e informar del grado de desequilibrio. Destacan las siguientes ventajas:

- Al estar basados en lecturas de tensiones fase-fase de la red eléctrica, los índices propuestos son aplicables en todos los casos. No existe restricción porque esas lecturas voltimétricas son habituales, accesibles con equipamiento ordinario, y siempre disponibles.

- Los índices propuestos se obtienen de sencillas operaciones aritméticas con números reales. Se elude la matemática de los números complejos o los valores angulares.

- La relación directa de los índices ADF y ADI con los valores de las tensiones fase-fase permite al operador técnico comprender mejor la naturaleza del desequilibrio. Al operar en la red sobre estas tensiones, los técnicos adquieren la capacidad de mantener el control del desequilibrio y ganan herramientas conceptuales de trabajo. Se dota la posibilidad de desarrollar actuaciones correctoras, limitadoras, preventivas y otras.

- La clasificación del fenómeno del desequilibrio descrita, aporta las claves para la interpretación gráfica de los lugares geométricos que ocupan los fasores de la alimentación desequilibrada. Debe señalarse que las mediciones, únicamente aportan tres números reales, mientras que el fenómeno es de naturaleza fasorial. Los índices SVL y ADF definen la elipse y fijan la posición de los fasores en equilibrio angular. Este estado tiene una enorme importancia práctica, no solamente por ser referencia para la valoración exacta, sino porque corresponde a un estado de desequilibrio

singular. En ese estado el VUF (índice internacional de valoración del grado de desequilibrio) toma su valor mínimo, y además las componentes de secuencia positiva y negativa de las tensiones del punto de la red alcanzan sus valores máximo y mínimo, respectivamente. Dentro de todos los posibles estados desequilibrados similares, es el estado que, en general, minimiza los perjuicios en las cargas eléctricas.

- Los índices propuestos se correlacionan matemáticamente de forma sencilla con los factores normalizados. Por ejemplo, el valor absoluto de ADF es el valor del factor PVU. En consecuencia, todos los resultados previos, teóricos y prácticos, obtenidos y vinculados a este último factor son fuertemente potenciados por el soporte científico en que se fundamenta el índice ADF.

- La forma aproximada de información del grado de desequilibrio conlleva una acotación numérica implícita del grado de desequilibrio, perfectamente definida y fácil de recordar: El valor ADI queda acotado en el margen $[0, \pm ADI_{\max}]$, (el signo está vinculado al tipo de desequilibrio informado). Esto permite una utilización responsable de una valoración que, ciertamente, es aproximada. La acotación es fácil de recordar por su ligazón con el ADF:

$$ADI_{\max} = \frac{|ADF|}{1 + ADF}$$

REIVINDICACIONES

1. Método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica formada por tres conductores activos (11), caracterizado por que comprende las etapas de:

5

- entre los puntos de conexión de la red eléctrica (15) correspondientes a cada par de conductores activos (11), medir el valor eficaz de la tensión fase-fase;

- anotar el valor eficaz asignado o nominal de tensión de la red eléctrica (U_{rd}).

10

- a partir de los tres valores eficaces de tensión fase-fase, calcular su valor medio aritmético (U_{avg}) y seleccionar el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o defecto, (U_{maxdev}) de dicho valor medio aritmético (U_{avg});

15

- obtener un índice que represente el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica (15);

- obtener un índice que represente la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente (U_{maxdev}) y el valor medio aritmético (U_{avg});

20

- obtener un índice que represente la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos (11) y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos (11);

25

- a partir de dichos tres índices, clasificar el desequilibrio de la red de tensión trifásica.

2- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el índice que representa el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica (15) se define como el cociente entre el valor medio aritmético (U_{avg}) de los tres valores eficaces de tensión fase-fase y el valor eficaz asignado o nominal de la tensión de la red eléctrica (U_{rd}):

30

$$SVL = \frac{U_{avg}}{U_{rtd}}$$

- 5 3- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}) de los tres valores eficaces de tensión fase-fase, y dicho valor medio aritmético (U_{avg}) es:

$$ADF = \frac{U_{maxdev} - U_{avg}}{U_{avg}}$$

10

- 4- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos (11) y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos (11), se define como el cociente entre la diferencia de los dos valores eficaces de tensión diferentes de U_{maxdev} , y U_{maxdev} ;
- 15

- 5- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además la etapa de informar del grado de desequilibrio de la siguiente forma:

- 20 -informar del tipo de desequilibrio, e
-indicar el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o por defecto, (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}), y dicho valor medio aritmético (U_{avg}).

- 25 6- El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además la etapa de informar del grado de desequilibrio de la siguiente forma:

- indicar el índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente, por exceso o por defecto, (U_{maxdev}) del valor medio aritmético (U_{avg}), y dicho valor medio aritmético (U_{avg}), e
 - indicar el índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos (11) y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores.
- 5

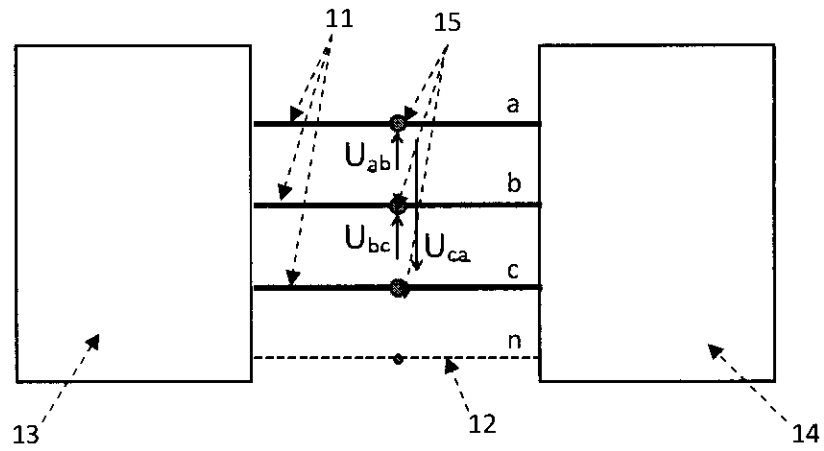


Figura 1

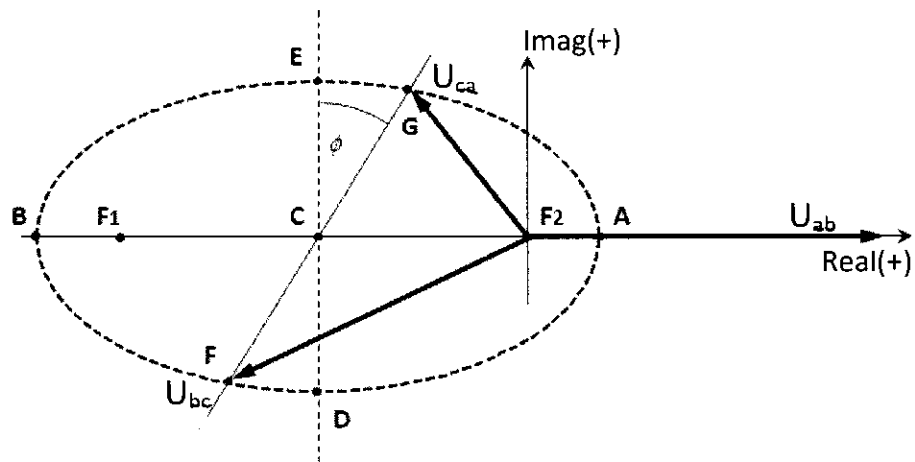


Figura 2

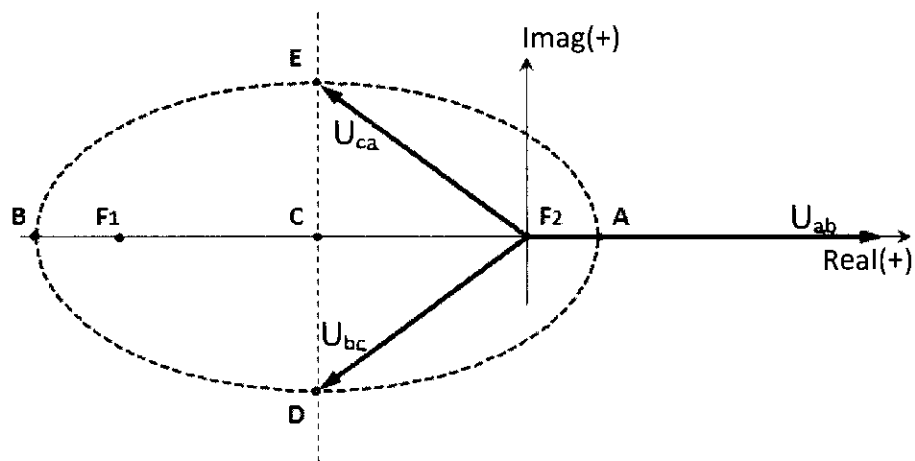


Figura 3



- ②¹ N.º solicitud: 201300455
②² Fecha de presentación de la solicitud: 10.05.2013
③² Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤¹ Int. Cl.: **G01R31/08** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ ⁶ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	US 4333050 A (YEASTING MAYNARD C) 01.06.1982, columna 2, líneas 4-41; reivindicación 1; resumen.	1-3,5-6
A		4
Y	EP 1819021 A2 (FINDER SPA) 15.08.2007, reivindicaciones 1-2; resumen.	1-3,5-6
A	US 2007085549 A1 (FISCHER NORMANN) 19.04.2007, resumen.	4

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
01.10.2013

Examinador
M. Argüeso Montero

Página
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01R

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 01.10.2013

Declaración**Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)**

Reivindicaciones 1-6
Reivindicaciones

SI
NO

Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)

Reivindicaciones 4
Reivindicaciones 1-3 y 5-6

SI
NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 4333050 A (YEASTING MAYNARD C)	01.06.1982
D02	EP 1819021 A2 (FINDER SPA)	15.08.2007
D03	US 2007085549 A1 (FISCHER NORMANN)	19.04.2007

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**- Reivindicación 1**

El documento D01 es el documento del estado de la técnica más próximo a la invención reivindicada.

En él (columna 2, líneas 4-41) se describe un método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica formada por tres conductores activos con las etapas de medir el valor eficaz de la tensión fase-fase; anotar el valor eficaz asignado; calcular el valor medio aritmético a partir de los valores eficaces de la tensión fase-fase y seleccionar el más alejado numéricamente; obtener un índice que represente el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica; y obtener un índice que represente la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente y el valor medio aritmético.

La diferencia con la invención reivindicada es que el documento D01 no describe una etapa del método consistente en obtener un índice que represente la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos.

Por otro lado, el documento D02, que se refiere también a un método de análisis del desequilibrio de una red eléctrica trifásica, indica (reivindicaciones 1 y 2) que se obtiene un índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer par de conductores activos y la tensión fase-fase de un segundo par de conductores activos.

Un experto en la materia a la vista de este segundo documento, puede tomar esta característica técnica para incluirla en el método del documento D01, llegando a la invención reivindicada.

Por tanto, la combinación de los documentos D01 y D02 afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 1, en el sentido del artículo 8 de la Ley de Patentes 11/1986, de 20 de marzo.

- Reivindicación 2

El documento D01 (reivindicación 1) describe el índice que representa el nivel de tensión en los puntos de conexión de la red eléctrica se define como el cociente entre el valor medio aritmético de los tres valores eficaces de tensión fase-fase y el valor eficaz asignado a la tensión de la red eléctrica.

Por tanto, la combinación de los documentos D01 y D02 afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 2, en el sentido del artículo 8 de la Ley de Patentes 11/1986, de 20 de marzo.

- Reivindicación 3

El documento D01 (columna 2, líneas 38-39) describe un índice que representa la discrepancia entre el valor eficaz más alejado numéricamente del valor aritmético medio de los tres valores eficaces de tensión fase-fase y dicho valor medio aritmético y que es igual a un valor proporcional esa diferencia respecto al valor aritmético medio.

Por tanto, la combinación de los documentos D01 y D02 afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 3, en el sentido del artículo 8 de la Ley de Patentes 11/1986, de 20 de marzo.

- Reivindicación 4

El documento D02 no indica que el índice que representa la desviación angular entre la tensión fase-fase de un primer y un segundo par de conductores activos se defina como el cociente entre la diferencia de los dos valores eficaces de tensión de diferentes del valor más eficaz más alejado numéricamente y este mismo valor.

Tampoco otros documentos del estado de la técnica anticipan esta característica técnica.

Por tanto, ni los documentos recuperados ni una combinación relevantes de los mismos afectan a la novedad o a la actividad inventiva de la reivindicación 4, en el sentido de los artículos 6 y 8 de la Ley de Patentes 11/1986, de 20 de marzo.

- Reivindicaciones 5 y 6

Las características técnicas de las reivindicaciones 5 y 6 pueden ser deducidas a partir de los métodos anticipados por los documentos D01 y D02.

Por tanto, la combinación de los documentos D01 y D02 afecta a la actividad inventiva de las reivindicaciones 5 y 6, en el sentido del artículo 8 de la Ley de Patentes 11/1986, de 20 de marzo.